Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 13, No. 2, 2023, p. 227-237

Predicting Whole-body Vibration-based on Linear Regression Models and Determining Permissible Exposure Time of Tractor Operator

A. Mohammadi[1], K. Kheiralipour[1*], B. Ghamary[1], A. Jahanbakhshi[1], R. Shahidi[2]

1- Mechanical Engineering of Biosystems Department, Ilam University, Ilam, Iran
2- Occupational Health Engineering Department, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran
(*- Corresponding Author Email: k.kheiralipour@ilam.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.73589.1071

Received: 14 November 2021 Revised: 11 December 2021 Accepted: 20 December 2021 Available Online: 20 December 2021	**How to cite this article:** Mohammadi, A., Kheiralipour, K., Ghamari, B., Jahanbakhshi, A., & Shahidi, R. (2023). Predicting Whole-body Vibration-based on Linear Regression Models and Determining Permissible Exposure Time of Tractor Operator. *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(2), 227-237. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2021.73589.1071

Introduction

The permissible exposure time to vibration for the operator is one of the key factors in maintaining the operator's health while optimizing machinery and equipment. The tractor studied was the ITM475, manufactured in Iran. The purpose of this study was to calculate the operator's permissible vibration exposure time while using the tractor to ensure the driver can maintain good bodily health.

Materials and Methods

In this study, experiments were conducted using a 3-axis vibration meter based on the ISO 2631 standard. The obtained data were analyzed through a factorial experiment using 18 treatments and 3 replications. The factors studied were engine rotation speed (at three levels of 1000, 1500, and 2000 rpm), road type (dirt and asphalt), and gear position (at three levels of 1, 2, and 3).

Results and Discussion

Various total vibration models were obtained for the tractor, and their determination coefficient varied from 90.11% for gear No. 3 on an asphalt road to 100% for gear No. 1 on an asphalt road and gear No. 2 on a dirt road. The maximum whole-body vibration, and consequently the minimum permissible exposure time, was observed for gear No. 3 at an engine rotation speed of 2000 rpm on a dirt road, which was 1.49 and 1.16 hours, respectively.

Conclusion

The maximum whole-body vibration experienced during an 8-hour tractor-driving session was measured at 0.85 m s^{-2}. It is important to note that the permissible exposure time decreases as vibration levels increase, and it reaches a limit of 1.16 hours. To ensure drivers adhere to these permissible exposure times across various driving conditions, measures must be implemented to reduce tractor vibration and minimize its transmission to the driver. By reducing overall tractor vibration and minimizing its impact on the driver, it becomes possible to increase the permissible exposure time for drivers.

Keywords: Engine rotational speed, Gear ratio, Modeling, Road, Vibration

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۲، ص ۲۳۷-۲۲۷

پیش‌بینی ارتعاش تمام بدن بر اساس مدل‌های رگرسیونی تک‌متغیره و تعیین مدت زمان مجاز مواجهه کاربر تراکتور

علی محمدی[۱]، کامران خیرعلی‌پور[۱*]، بهرام قمری[۱]، احمد جهانبخشی[۱]، رضا شهیدی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

چکیده

مدت زمان مجاز مواجهه کاربر با ارتعاش یکی از عامل‌های اصلی در حفظ سلامت کاربر از یک طرف و بهینه‌سازی ماشین‌ها و تجهیزات از طرف دیگر می‌باشد. تحقیق حاضر به‌منظور محاسبه مدت زمان مجاز مواجهه کاربر با ارتعاش تراکتور ITM475 صورت پذیرفته است. آزمایش‌های این پژوهش با استفاده از یک ارتعاش‌سنج سه جهته و بر اساس استاندارد بین‌المللی ارتعاش ISO 2631-1 انجام گرفت. اطلاعات به‌دست آمده براساس اندازه‌گیری‌های به‌عمل‌آمده از ۱۸ تیمار و ۳ تکرار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. عامل‌های مورد بررسی شامل دور موتور در سه سطح ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه، موقعیت دنده در سه سطح دنده ۱، ۲ و ۳ و نوع جاده در دو سطح خاکی و آسفالت بود. بیشترین میزان ارتعاش کل بدن و به تبع آن کمترین مدت زمان مجاز مواجهه در جاده خاکی، دور موتور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، و دنده ۳ بوده که مقدار آن‌ها به‌ترتیب برابر ۱/۴۹ متر بر مجذور ثانیه و ۱/۱۶ ساعت بود. ضمن رعایت مدت زمان مجاز مواجهه توسط کاربران این تراکتور، نیاز است تمهیداتی برای کاهش ارتعاش تمام بدن کاربر تراکتور مورد نظر اندیشیده شود.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش، جاده، دور موتور، مدل‌سازی، نسبت دنده

مقدمه

در عصر حاضر، کشاورزی بدون استفاده از ماشین امری بعید می‌باشد. امروزه ماشین‌های کشاورزی یکی از نهاده‌های مهم تأثیرگذار در توسعه کشاورزی و افزایش بهره‌وری در این بخش می‌باشد؛ تا حدی که یکی از شاخص‌های اندازه‌گیری پیشرفت کشاورزی در هر کشور درجه مکانیزاسیون آن می‌باشد. امروزه بخش عظیمی از نیروی کار در بخش کشاورزی حضور دارند که بر اساس اطلاعات منتشرشده از سازمان آمار جهانی حدود ۲۰/۰۴ درصد نیروی کار را شامل می‌شود (Boshuizen, Bongers, & Hulshof, 1990; Jahanbakhshi, Ghamari, & Heidarbeigi, 2016; Jahanbakhshi, Ghamari, & Heidarbeigi, 2017; Jahanbakhshi & Heidarbeigi, 2019). با توجه به جایگاه ویژه تراکتور به‌عنوان منبع توان برای ادوات و ماشین‌ها در عملیات مختلف کشاورزی، استفاده از آن مشکلاتی از جمله ارتعاش را به همراه دارد (Faraji, Heidarbeigi, & Samadi, 2021). از جمله مشکلات مکانیزه کردن کشاورزی ارتعاشات منتشرشده از ماشین‌ها می‌باشد که دارای اثرات نامطلوبی بر روی انسان از جمله بیماری‌های مختلف تأثیرگذار بر رگ‌های خونی، اعصاب، ماهیچه‌ها، کاهش بازده کاری و افزایش حوادث می‌گردد (Boshuizen *et al.*, 1990).

آن‌چه که در ارتباط بین ارتعاش اجسام در محیط و انسان از نظر بهداشت و سلامت حائز اهمیت است، مخاطره‌آمیز بودن میزان انرژی برخی امواج ارتعاشی در تماس مستقیم با اعضا و اندام‌ها می‌باشد. انتقال انرژی مکانیکی از یک منبع مرتعش به بدن می‌تواند باعث اختلال در راحتی یا آسایش فرد، کاهش بازدهی در اثر خستگی ناشی از ارتعاش و نیز اختلال در اعمال فیزیولوژیک کارگر یا در مواردی نیز می‌تواند باعث اختلالات اسکلتی-عضلانی و برخی بیماری‌ها گردد. مطالعه ارتعاش انسانی شامل دو بخش اصلی است: ارتعاش تمام بدن و ارتعاش دست-بازو. ارتعاش دست-بازو از وسایل مرتعش دستی

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران
۲- گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: k.kheiralipour@ilam.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.73589.1071

مانند مته برقی، چکش، کلنگ، اره‌های چوب‌بری و غیره تولید می‌گردد. ارتعاشی که به تمام بدن وارد می‌شود در محدوده بسامد بحرانی HZ ۸۰-۱ مورد مطالعه قرار می‌گیرد و طی استاندارد ISO-2631 مورد بحث قرار گرفته است. در ارتعاش تمام بدن سطح وسیعی از بدن در تماس با جسم مرتعش و حتی ممکن است کل بدن در یک محیط مرتعش مانند رانندگان ماشین‌های کشاورزی و اتومبیل‌ها قرار گیرد (Golmohammadi, 2010).

در حال حاضر ارتعاش از معضلات اساسی دنیای صنعتی و بخش کشاورزی بوده و خیل عظیمی از افراد در محیط کار خود و در محل زندگی از آزار ناشی از آن‌ها در مخاطره هستند، لذا تحقیقات مختلفی جهت بررسی وضعیت خستگی در اثر ارتعاش و مدت زمان مواجهه کاربر با ارتعاش گزارش شده است که در اینجا به مواردی از آن‌ها در بخش کشاورزی اشاره شده است. تواری و همکاران (Tewari, Dewangan, & Karmakar, 2004) در بررسی خستگی کاربرهای تراکتور دستی، تراکتورهای دارای صندلی و فاقد صندلی را با هم مقایسه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به‌طور میانگین میزان کمردرد در کاربرهای تراکتورهای دارای صندلی به میزان ۲۷٪ نسبت به تراکتورهای بدون صندلی کمتر است. ملکی (Maleki, 2008) در تحقیقی به بررسی بسامدهای بحرانی اندام‌های بدن راننده تراکتور پرداخت. نتایج تحقیق ایشان بیانگر افزایش مقدار ارتعاش طولی در بسامدهای ۳-۴ هرتز برای اندام‌های بدن بود. محمدی و همکاران (Mohammadi, Mirzaee, & Ghal Jehi, 2009) در تحقیقی میزان مواجهه با ارتعاش و اختلالات اسکلتی-عضلانی رانندگان تراکتور را مورد بررسی قراردادند. در تحقیقی نصیری و همکاران (Nasiri, Mohammadi, Beheshti, Azam, & Hajizadeh, 2013) مدت زمان مجازمواجهه رانندگان تراکتور مسی فرگوسن مدل ۱۶۵ با ارتعاش کل بدن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامترهای مربوط به ارتعاش تمام بدن مانند شتاب ریشه مجموع مربعات، شتاب معادل کلی، میزان ارتعاش به‌صورت مجزا در تراکتور مسی فرگوسن مدل ۱۶۵ و در سه حالت مختلف انتقال (بدون تریلی، با تریلی خالی و همراه با تریلی با بار خاک) شخم‌زدن زمین و بارگیری تریلی خاک با تراکتور و در وضعیت‌های کاری با دنده‌های اندازه‌گیری و با میزان مجاز مقایسه کردند. آن‌ها گزارش نمودند که در تمام موقعیت‌های اندازه‌گیری‌شده میزان مواجهه با ارتعاش کل بدن بیش از میزان مجاز بوده و خطر بروز اختلالات ناشی از ارتعاش وجود دارد. بیگ‌زاده (Beigzadeh, 2013) به بررسی و تحلیل ارتعاشات سم‌پاش پشتی موتوری پرداخت. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که با افزایش سرعت دورانی موتور میانگین شتاب ارتعاش به‌طور کلی در همه موقعیت‌ها افزایش می‌یابد. همچنین گزارش نمود که افزایش دور موتور در تمام حالات باعث افزایش ارتعاش در هر جهت شد و حجم سم تانک سم‌پاش پشتی موتوری تأثیر محسوسی بر ارتعاش نداشت. نصیری و همکاران (Nasiri, Beheshti, & Hajizadeh, 2014) به ارزیابی میزان مواجهه کاربران تیلر با ارتعاش پرداختند. آن‌ها چهل کاربر تیلر و پارامترهای مربوط به ارتعاش دست و بازو و کل بدن در حالت‌ها و جهت‌های گوناگون کاری اندازه‌گیری و با میزان مجاز مقایسه نمودند و گزارش نمودند میزان مواجهه ارتعاش کل بدن بیش از میزان مجاز بوده، زمان مجاز کاری در حد چند ثانیه است و خطر بروز اختلالات اسکلتی عضلانی وجود دارد. احمدی و همکاران (Ahmadi, Ghamari, & Kheiralipour, 2017) و دهام و همکاران (Dahham, Tawfik, & Saleh, 2019) ارتعاشات تراکتورهای مختلف را با استفاده از ارتعاش‌سنج تک‌جهته اندازه‌گیری نمودند. نتایج تحقیقات جهان بخشی و همکاران (Jahanbakhshi, Ghamari, & Heidarbeigi, 2020) نشان داد که تجزیه واریانس اثر عامل‌های اصلی دور موتور و موقعیت دنده در سطح احتمال ۱٪ بر سطح ارتعاش منتشرشده از صندلی کمباین معنی‌دار بود. ایشان گزارش نمودند که در دنده ۱ و ۲ با سرعت موتور ۱۸۰۰ دور در دقیقه و دنده ۱ با سرعت موتور ۲۵۰۰ دور در دقیقه، راننده می‌تواند بدون هیچ مشکلی به مدت ۸ ساعت در روز رانندگی نماید. با توجه به بررسی منابع، مشخص شد که در مورد مدت زمان مواجهه کاربر تراکتور ITM 475 مطالعه‌ای صورت نگرفته است. بنابراین هدف از تحقیق حاضر اندازه‌گیری ارتعاش کل وارده بر بدن و محاسبه مدت زمان مجاز مواجهه کاربر این نوع تراکتور در شرایط مختلف دور موتور، نسبت دنده، و جاده می‌باشد تا مشخص شود در شرایط مختلف، هر کاربر چه مدت زمان می‌تواند از این تراکتور استفاده نماید.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش داده‌های ارتعاش صندلی تراکتور ITM475 در سه جهت (X، Y و Z) حین حرکت بر روی جاده آسفالت و خاکی در دانشگاه علوم پزشکی همدان دانشکده بهداشت، اندازه‌گیری شدند. برای انجام آزمون‌ها از یک دستگاه تراکتور ITM475، جفت دیفرانسیل، چهار سیلندر، با وزن ۳۱۷۰ کیلوگرم و توان ۷۵ اسب بخار، ساخت سال ۱۳۹۳ کارخانه تراکتورسازی ایران استفاده شد. در این پژوهش تراکتور قبل از انجام آزمون‌ها مورد بازرسی فنی قرارگرفته و سرویس‌های دوره‌ای جهت آماده‌سازی بر روی آن انجام گرفت. تراکتور مورد آزمون در این پژوهش بدون اتاقک یا قاب ایمنی بود. همچنین تراکتور با مخزن سوخت و رادیاتور پر با وزنه‌های سنگین‌کننده عقبی و جلویی تایر و بدون ادوات و تجهیزات سوارشونده و هرگونه قطعه خاص انتخابی مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس استانداردهای ملی تایرهای تراکتور مورد استفاده در آزمون باید دارای اندازه استاندارد باشد. عمق عاج تایر نباید کمتر از ۶۵ درصد عمق عاج تایر نو باشد، دیوارهای تایر نباید دارای صدمه‌دیدگی بوده و

فشار تایر باید میانگین حسابی گستره‌های توصیه‌شده به‌وسیله سازنده باشد. تایرها حداقل دو مرتبه مسیر آزمون را قبل از شروع مراحل آزمون طی نموده تا گرم شوند. فشار تایر قبل و بعد از انجام مجموعه آزمون‌ها اندازه‌گیری و در محدوده ۵± کیلوپاسکال یکدیگر قرار داشتند. تنظیم عرض چرخ باید همان تنظیم معمول در شرایط عادی مزرعه برای تراکتور دارای صندلی باشد تمامی مشخصه‌های ذکر شده برای تراکتور ITM475 مورد آزمایش، کاملاً مطابق با شرایط مندرج در مقررات استاندارد ملی ایران، شماره ۱۴۱۳۳ (Iranian National Standard No. 14133) رعایت شد.



شکل ۱– ارتعاش‌سنج مورد استفاده

Fig.1. The used vibration meter instrument

در این تحقیق برای اندازه‌گیری ارتعاش، از یک دستگاه ارتعاش‌سنج سه‌جهته مدل B&K۲۲۶۰، ساخت شرکت برول و کیار[۱]، دانمارک، با دقت ۰/۱ $\mu m.s^{-2}$ و محدوده فرکانس ۱۰۰-۰/۴ Hz استفاده شد (شکل ۱).

ارتعاش‌سنج دارای یک صفحه نیمه‌صلب، با ضخامت ۱۲ میلی‌متر و از جنس لاستیک بود. آزمون‌ها در این پژوهش حین حرکت بر روی جاده آسفالت و خاکی در دانشگاه علوم پزشکی همدان، دانشکده بهداشت، ذخیره شدند. شکل ۲ تراکتور مورد آزمون بر روی جاده آسفالت را نشان می‌دهد. حسگر با استفاده از چسب بر روی صندلی مهار شد و آزمون‌های لازم جهت استخراج سیگنال‌های ارتعاش صندلی انجام گرفت. در شکل ۲ صندلی و نحوه اتصال حسگر به آن نشان داده شده است.

جهت ارزیابی ارتعاش وارده بر سرنشین در استانداردهای جهانی، روش‌های مختلفی بیان گردیده که سه روش از آن در این پژوهش در نظر گرفته شد (ISO 2631-1, 1997) که شامل ارزیابی اولیه، ارزیابی آسایش و راحتی راننده، و ارزیابی محدوده سلامتی راننده می‌باشند. جهت ارزیابی اولیه باید موارد زیر به‌ترتیب انجام گیرند: اساس ارزیابی ارتعاش‌های وسیله، استفاده از میانگین ریشه مربع‌های شتاب‌های وزن‌دار شده است. این عامل برای شتاب‌های خطی برحسب متر بر مجذور ثانیه و برای شتاب‌های زاویه‌ای برحسب رادیان بر مجذور ثانیه بیان می‌گردد (ISO 2631-1, 1997). عامل شوک (فاکتور تیزی) برابر نسبت بیشینه مقادیر سیگنال شتاب وزن‌دار شده به مقدار میانگین ریشه مربع‌های شتاب می‌باشد. عامل شوک معیاری برای بررسی روش ارزیابی ارتعاش‌های وارده بر بدن راننده است. برای ارتعاش‌هایی با عامل شوک کمتر از نه تعیین میانگین ریشه مربع‌های شتاب کافی است؛ درصورتی‌که برای مقادیر بیشتر از نه باید روش ارزیابی دیگری اتخاذ گردد (ISO 2631-1, 1997). برای ارزیابی سلامتی کاربر به این روش عمل می‌شود (ISO 2631-1, 1997): ۱- برای کلیه اندام‌های راننده که با وسیله مورد نظر در تماس می‌باشند، میانگین ریشه مربع‌های شتاب در هر سه جهت محاسبه گردد و ۲- جمع برداری شتاب در نقاط مورد نظر محاسبه

1- Brüel & Kjær

گردد. جهت ارزیابی آسایش و راحتی راننده پس از به‌دست آوردن شتاب‌ها در هر یک از جهت‌های سه‌گانه و یا محاسبه شتاب‌های زاویه‌ای در آن نقطه، این مقادیر در ضرایب ثابتی که در استانداردهای جهانی بیان شده، ضرب می‌گردند و شتاب نهایی محاسبه شده با توجه به جداول موجود در این استانداردها ارزیابی خواهند شد. به‌عنوان مثال، این ضرایب برای شخصی که روی یک صندلی نشسته و تنها در معرض شتاب‌های خطی قرار دارد، برای هر سه جهت برابر یک می‌باشد ولی اگر همین شخص در معرض شتاب زاویه‌ای قرار گیرد این ضرایب بسته به نوع و جهت شتاب از ۰/۲۵ تا ۰/۸ متغیر است (ISO 2631-1, 1997). ارتعاش کل (برآیند سه جهت) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (ISO 2631-1, 1997):

$$a_t = \sqrt{(1.4a_x)^2 + (1.4a_y)^2 + a_z{}^2} \quad (۱)$$

که a_x، a_y، a_z و a_t به‌ترتیب میانگین ریشه مربع‌های شتاب در جهت طولی، عرضی، عمودی و شتاب کلی بر حسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشد.



شکل ۲– صندلی تراکتور و اتصال تجهیزات اندازه‌گیری ارتعاش (راست) و اندازه‌گیری ارتعاش صندلی تراکتور حین حرکت بر روی جاده آسفالت (چپ)

Fig.2. The tractor seat and connection of vibration measuring equipment (right) and measurement of tractor seat vibration while the tractor is running on an asphalt road (left)

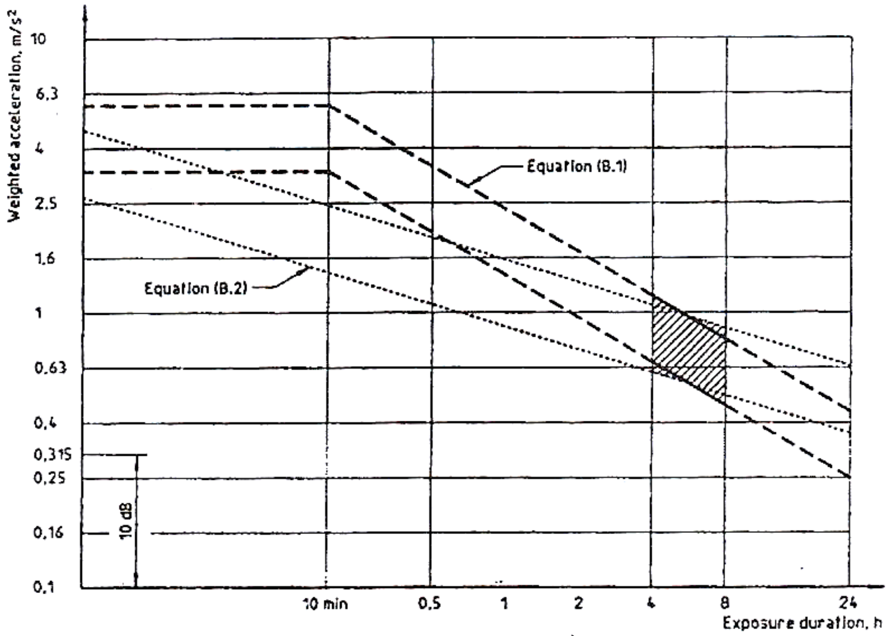
هرچه زمان تماس با ارتعاش بیشتر باشد، صدمات وارده بیشتر می‌باشد. جهت بررسی آثار و صدمات فیزیولوژیکی ارتعاش به بدن سه شاخص وجود دارد: ۱- شاخص کاهش آسایش یا راحتی: این شاخص برای وسایل حمل‌ونقل و مسافرتی به‌کار می‌رود و حدودهایی را تعیین می‌کند که بالای آن حد باعث رنج و ناراحتی مسافر می‌شود، ۲- شاخص کاهش مهارت در اثر خستگی: این شاخص حدودی را تعیین می‌کند که چنان‌چه مقدار ارتعاش وارده بر بدن بیش از حد تعیین‌شده باشد، دقت و مهارت فرد افت پیدا می‌کند و نهایتاً بازده کاری فرد کاهش پیدا می‌کند، ۳- شاخص حدود مواجهه: این شاخص حدودی را پیشنهاد می‌کند که بالاتر از آن حدود صدمات فیزیولوژیکی به انسان وارد می‌شود و در اثر عدم رعایت این شاخص بیماری‌های ناشی از ارتعاش در انسان به‌وجود می‌آید (Sanai, Ghazaee, Zia Zarifi, & Habibi, 1995). پاسخ بدن به ارتعاش، متناسب با میزان انرژی وارده بر بدن است. بنابراین، اگر محدوده معینی از اثر یا پاسخ فیزیولوژیک در نظر گرفته شود، همواره ارتباطی بین میزان شتاب وارده و مدت زمانی که کاربر در معرض ارتعاش است، برقرار می‌باشد. این بدان معنی است که برای ایجاد اثرات یکسان با افزایش شتاب وارده بر بدن مدت زمان مواجهه کوتاه‌تری مورد نیاز است و برعکس هرگاه شتاب وارده بر بدن کوچک باشد؛ مدت زمان طولانی‌تری را برای ایجاد اثرات می‌طلبد. بر این اساس، دو الگوی زیر به صورت رابطه‌های (۲) و (۳) برای این تناسب معرفی شده است (Golmohammadi, 2010):

$$(B.1) \qquad A_{eq(T1)} \times T_1^2 = A_{eq(T2)} \times T_2^2 \quad (۲)$$

$$(B.2) \qquad A_{eq(T1)} \times T_1^{1/4} = A_{eq(T2)} \times T_2^{1/4} \quad (۳)$$

که B.1 و B.2 دو الگوی معرفی‌شده، $A_{eq(Ti)}$ شتاب معادل کلی مواجهه در مواجهه‌های ۱ و ۲ و T_1 و T_2 زمان‌های مواجهه در دو وضعیت می‌باشد.

با توجه به هر دو الگو محدوده مخاطره با داشتن شتاب معادل کلی تعیین می‌شود. برای هر کدام از دو الگو معرفی شده دو مرز معین شده است (شکل ۳). مرز B2 در شکل ۳ حد مراقبت (حد عمل یا مرز حداقل) بوده که مواجهه با ارتعاش در زیر این مرز بدون مخاطره است و مرز B1 محدوده مجاز را نشان می‌دهد که زیر آن مجاز و بالای آن ناحیه مخاطره بهداشتی می‌باشد و محدوده بین این دو مرز منطقه احتیاط است.



شکل ۳– مدت زمان مجاز مواجهه با ارتعاش (ISO 2631-1, 1997). ناحیه زیر مرز B2 حد عمل، ناحیه زیر مرز B1 محدوده مجاز و ناحیه بین این دو مرز محدوده احتیاط است.

Fig.3. Permissible vibration exposure range (ISO 2631-1, 1997). The area under the B2 boundary is the action limit, the area under the B1 boundary is the exposure range, and the area between the two boundaries is the caution range

عامل‌های مورد بررسی در این پژوهش عبارت بودند از: دور موتور (در سه سطح ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه)، نسبت دنده (در سه سطح دنده ۱، ۲ و ۳) و نوع جاده (در دو سطح خاکی و آسفالت) که در سه تکرار انجام شدند. برای اندازه‌گیری ارتعاش صندلی تراکتور کل ۵۴ آزمایش مطابق با استاندارد (ISO 2631-1 (1997 و Iranian National Standard No. 14133 (2011) انجام شد. صندلی طبق دستور کارخانه سازنده بر حسب جرم شخص مورد آزمایش تنظیم شد. از آن‌جا که جرم‌های متفاوت نتایج آزمون‌های ارتعاش را تحت تأثیر قرار می‌دهند، برای انجام آزمون‌ها در این تحقیق از یک کاربر با جرم ۷۵ کیلوگرم استفاده گردید.

جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار Excel 2013 استفاده شد. مقادیر ارتعاش تمام بدن در شرایط مختلف رانندگی تراکتور محاسبه شد و مقدار میانگین آن‌ها به‌دست آمد. سپس بر اساس مقادیر میانگین به‌دست آمده، مدت زمان مجاز مواجهه تعیین شد. برای پیش‌بینی ارتعاش کل بدن کاربر تراکتور از رگرسیون تک‌متغیره استفاده شد. رگرسیون روشی برای مدل‌سازی ریاضی داده‌ها است تا بتوان نتایج مربوط به حالت‌هایی که آزمایشی برای آن‌ها صورت نگرفته است، پیش‌بینی نمود. بر اساس این روش، مدل‌هایی برای ارتعاش تمام بدن بر حسب دور موتور برای نسبت دنده‌ها و جاده‌های مختلف به‌دست آمد.

نتایج و بحث

ارتعاش کل بدن (برآیند جهت‌های سه‌گانه x، y و z) در سرعت و موقعیت دنده‌های مختلف تراکتور در حرکت بر روی جاده آسفالت و خاکی در جدول ۱ آمده است. با توجه به این جدول، با افزایش سرعت موتور از ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و نسبت دنده از ۱ تا ۳، برآیند ارتعاش کل صندلی تراکتور افزایش می‌یابد که علت آن می‌تواند افزایش تعداد کورس‌های احتراق و ضربات پیستون و نیروهای اینرسی موتور در واحد زمان، افزایش سرعت پیشروی و اثرات سطح جاده باشد. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق تقی زاده (Taghizade Alisaraee, 2011) که ارتعاشات تراکتور MF399 در هشت دور موتور از ۸۰۰ تا ۲۲۰۰ دور بر دقیقه را اندازه‌گیری نمودند، مشابه است.

میزان ارتعاش صندلی تراکتور مربوط به جاده خاکی برای تمامی سرعت‌های موتور و نسبت دنده‌های مورد بررسی، بیشتر از حالت حرکت بر روی جاده آسفالت بود. علت این موضوع اختلاف نوع سطح و ناهمواری‌های جاده خاکی نسبت به جاده آسفالت است؛ زیرا جنس سطح جاده تأثیر مستقیمی بر ارتعاش تراکتور در حال حرکت و ارتعاش رسیده به صندلی تراکتور دارد.

مقادیر ارتعاش کل ایجاد شده توسط سرعت‌های مختلف موتور

بیشتر از دنده‌های مختلف جعبه‌دنده می‌باشد که علت اصلی آن افزایش تعداد کورس احتراق و ضربات پیستون در واحد زمان که عامل اصلی تولید ارتعاش است، می‌باشد. از طرف دیگر علت افزایش شتاب ارتعاش با تغییر دنده از ۱ تا ۳، افزایش سرعت پیشروی است. این نتایج مشابه نتایجی است که احمدیان و همکاران (Ahmadian, Hassan-Beygi, & Ghobadian, 2014) و تقی زاده و همکاران (Taghizade Alisaraee, Tavakoli Hashjin, & Ghobadian, 2007) گزارش نموده‌اند. تقی زاده و همکاران (Taghizade Alisaraee et al., 2007) در بررسی ارتعاش صندلی تراکتور یونیورسال 650M در راستای عمودی در پنج دور موتور ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ دور در دقیقه گزارش دادند که ارتعاش در تمامی دورهای موتور در صندلی تراکتور مساوی با دو برابر بسامد دور موتور یا برابر با ضربات پیستون موتور در مرحله توان (انفجار سوخت در سیلندر) است و با افزایش دور موتور بسامد ارتعاش صندلی افزایش می‌یابد. احمدیان و همکاران (Ahmadian *et al.*, 2014) در بررسی ارتعاش دسته و صندلی تراکتور نشان دادند که ارتعاش با افزایش سرعت موتور در تمامی سطوح دنده و در تمام جهات افزایش می‌یابد.

جدول ۱- ارتعاش کل بدن مربوط به صندلی تراکتور ITM475

Table 1- Whole-body vibration related to the seat of the ITM475 tractor

دور موتور Engine speed (rpm)	نوع جاده Road type	موقعیت دنده Gear ratio	ارتعاش کل بدن Whole-body vibration (m.s^{-2})
1000	آسفالت Asphalt	1	0.23
		2	0.32
		3	0.43
	خاکی Dirt	1	0.50
		2	0.65
		3	1.11
1500	آسفالت Asphalt	1	0.33
		2	0.40
		3	0.56
	خاکی Dirt	1	0.69
		2	0.90
		3	1.31
2000	آسفالت Asphalt	1	0.43
		2	0.49
		3	1.04
	خاکی Dirt	1	0.85
		2	1.15
		3	1.49

ملمز و همکاران (Melemez, Tunay, & Emir, 2013) در بررسی ارتعاش تمام بدن تراکتور Ford 6610، International 444 و Leyland 154 در ترکیه بر روی جاده‌های آسفالت و جنگلی، میزان ارتعاش اندازه‌گیری‌شده را بین ۰/۷۶ تا ۱/۵۱ m s^{-2} گزارش دادند. نصیری و همکاران (Nasiri *et al.*, 2013) ارتعاش معادل تراکتور مسی فرگوسن مدل ۱۶۵را در ایران و حالت‌های مختلف انتقال (بدون تریلی، همراه تریلی خالی و همراه با تریلی با بار خاک)، شخم زدن زمین، و بارگیری تریلی خاک با تراکتور و در وضعیت‌های کاری با دنده‌های مختلف بر اساس استاندارد ISO 2631 اندازه‌گیری نمودند. محققین میزان ارتعاش معادل برای تراکتور فرگوسن مدل ۱۶۵ در حالت‌های مختلف از ۰/۶۳ تا ۲/۳۵ m s^{-2} را به‌دست آوردند.

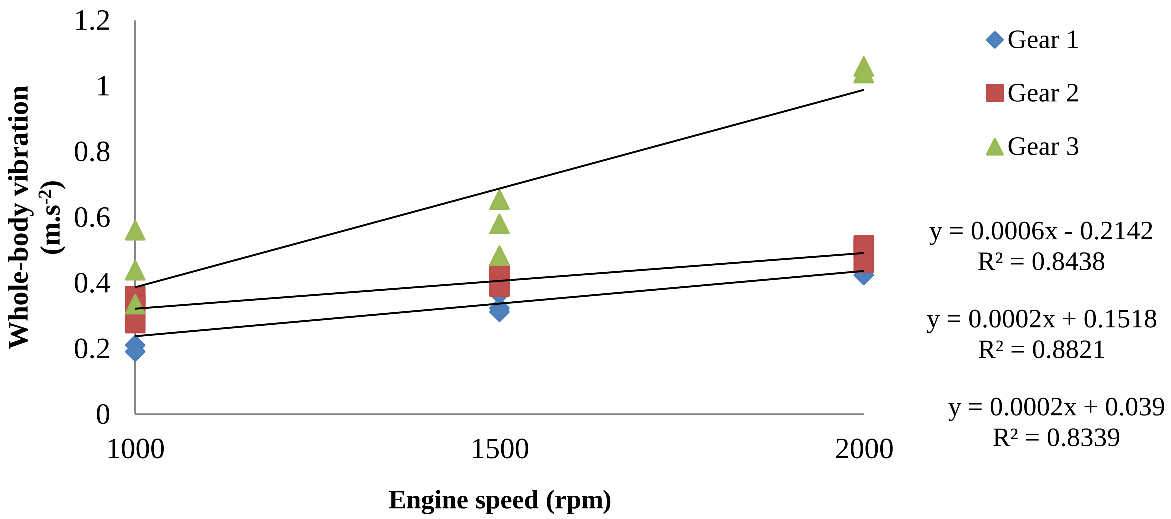
شکل ۴ مدل‌های رگرسیونی ارتعاش کل تراکتور مورد بررسی در جاده آسفالت و خاکی را نشان می‌دهند. مدل‌های رگرسیونی مربوط به جاده آسفالت در دنده‌های ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب در روابط (۴) تا (۶) آمده‌اند. ضریب تبیین مدل ارتعاش کل تراکتور مورد بررسی در دنده‌های مختلف از ۸۳/۳۹٪ تا ۸۸/۲۱٪ بر روی جاده آسفالت متغیر بود.

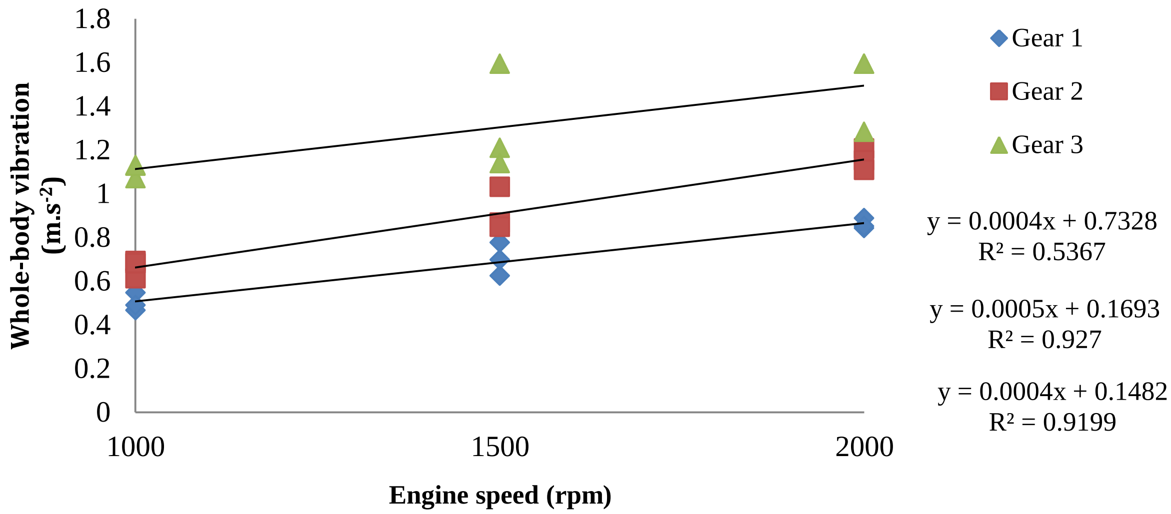
$$TV = 0.0002ERS + 0.039 \quad R^2 = 0.83 \quad (۴)$$

$$TV = 0.0002ERS + 0.1518 \quad R^2 = 0.88 \quad (۵)$$

$$TV = 0.0006ERS - 0.2142 \quad R^2 = 0.84 \quad (۶)$$

در اینجا TV ارتعاش کل، ERS دور موتور و R^2 ضریب تبیین می‌باشد.





شکل ٤- مدل‌های رگرسیونی ارتعاش تمام بدن در جاده آسفالت (بالا) و جاده خاکی (پایین)

Fig.4. The regression models of whole-body vibration on an asphalt road (top) and dirt road (bottom)

مدل‌های رگرسیونی مربوط به ارتعاش کل بدن تراکتور مورد بررسی در جاده خاکی در دنده‌های ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب در رابطه‌های (۷) تا (۹) آمده‌اند. ضریب تبیین مدل ارتعاش کل تراکتور مورد بررسی در جاده خاکی از ۵۳/۶۷٪ تا ۹۲/۷۰٪ متغیر می‌باشد.

$$TV = 0.0004ERS + 0.1482 \quad R^2 = 0.92 \qquad (۷)$$

$$TV = 0.0005ERS + 0.1693 \quad R^2 = 0.93 \qquad (۸)$$

$$TV = 0.0004ERS + 0.7328 \quad R^2 = 0.54 \qquad (۹)$$

در اینجا TV ارتعاش کل، ERS دور موتور و R^2 ضریب تبیین می‌باشد.

با استفاده از مدل‌های (۴) تا (۹) می‌توان ارتعاش کل بدن تراکتور مورد بررسی را در هر دور موتور دلخواه، با دقت بالایی پیش‌بینی نمود و سپس مدت زمان مجاز مواجهه کاربر با ارتعاش این نوع تراکتور را محاسبه نمود. قابل ذکر است که دقت مدل مربوط به دنده ۳ و جاده خاکی پایین بوده است (۰/۵۴). این موضوع به دلیل تغییرات زیاد بین نتایج تکرارهای انجام شده در این شرایط می‌باشد که آن را می‌توان به تغییرات ناهمگن سطح جاده خاکی نسبت داد، چرا که ممکن است سطح جاده خاکی در جایی صاف‌تر و در جایی دیگر ناصاف‌تر باشد. به‌منظور دستیابی به یک مدل جامع برای پیش‌بینی ارتعاش کل بدن کاربر تراکتور مورد بررسی، از رگرسیون چندمتغیره با استفاده از نرم‌افزار متلب بهره گرفته شد.

پس از محاسبه مدت زمان مجاز مواجهه کاربر با ارتعاش تراکتور مورد بررسی، نتایج آن در جدول ۲ گزارش شده است. نتایج خاکی از

آن است که اثر عامل‌های اصلی دور موتور، موقعیت دنده، نوع جاده و اثر متقابل دور موتور در نوع جاده، موقعیت دنده در نوع جاده، دور موتور در موقعیت دنده و دور موتور در موقعیت دنده در نوع جاده در سطح احتمال ۱٪ بر مدت زمان مجاز مواجهه کاربر تراکتور معنی‌دار بود.

بر اساس الگوی مورد پذیرش در ایران که توسط کمیته فنی بهداشت حرفه‌ای کشور که ۸ ساعت کار روزانه و ۴۰ ساعت کار هفتگی را اعلام نموده و همچنین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود که در دنده ۳ با دور موتور ۱۰۰۰ دور در دقیقه و در دنده ۲ و ۳ با سرعت موتور ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه در جاده خاکی و در دنده ۳ با دور موتور ۲۰۰۰ دور در دقیقه در جاده آسفالت، کاربر تراکتور مورد بررسی مجاز نمی‌باشد به مدت ۸ ساعت در روز رانندگی نماید. بنابراین راننده تراکتور مورد نظر هنگام رانندگی در این شرایط، باید به‌منظور حفظ سلامتی خود، کمتر از ۸ ساعت در روز رانندگی نماید یا شرایط رانندگی را تغییر دهد. البته در سایر دورها و دنده‌های آزمایش شده در جدول بالا، راننده تراکتور مجاز است بیشتر از ۸ ساعت نیز رانندگی نماید. بنابراین انتخاب دور و دنده مربوطه برای تعیین ساعات مجاز رانندگی در روز مهم می‌باشد.

جدول ۲- مدت زمان مجاز مواجهه کاربر تراکتور

Table 2- Permissible exposure time of tractor operator

دور موتور Engine speed (rpm)	نوع جاده Road type	موقعیت دنده Gear ratio	مدت زمان مجاز مواجهه Permissible exposure time (h)
1000	آسفالت Asphalt	1	894.46
		2	298.73
		3	98.35
	خاکی Dirt	1	60.48
		2	22.16
		3	3.34
1500	آسفالت Asphalt	1	261.61
		2	133.13
		3	37.54
	خاکی Dirt	1	18.08
		2	6.94
		3	1.79
2000	آسفالت Asphalt	1	97.27
		2	63.23
		3	4.12
	خاکی Dirt	1	8.44
		2	2.92
		3	1.16

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدت زمان مجاز مواجهه کاربر تراکتور، می‌توان گفت که اثر کاهش دور موتور بر افزایش مدت زمان مواجهه کاربر بیشتر از کاهش نسبت دنده تراکتور می‌باشد و برعکس. این نتیجه بیان می‌کند که به‌منظور افزایش سرعت پیشروی تراکتور، بهتر است راننده تراکتور به‌جای افزایش دور موتور، نسبت دنده را افزایش دهد تا ارتعاش تمام بدن ثابت بماند یا به مقدار کمتری افزایش یابد.

با استفاده از این مدل‌ها می‌توان دور مناسب موتور تراکتور برای رانندگی به مدت ۸ ساعت در روز را تخمین زد. با توجه به شکل ۳ حداکثر ارتعاش تمام بدن برای مدت واجهه ۸ ساعت در روز، برابر ۰/۸۵ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. بر این اساس و با استفاده از مدل‌های به‌دست‌آمده (رابطه‌های (۴) تا (۹)) می‌توان حداکثر دور موتور برای کار با تراکتور بر روی جاده‌های خاکی و آسفالت و نسبت دنده‌های مختلف تخمین زد. نتایج مربوط به محاسبه حداکثر دور موتور تراکتور مورد بررسی در شرایط مختلف جاده و نسبت دنده برای کار مجاز به مدت ۸ ساعت در روز در جدول ۳ ارائه شده است.

دورهای بالاتر از ۲۰۰۰ دور بر دقیقه در جدول ۳ نشان می‌دهد که استفاده از تراکتور در شرایط مربوطه با دور موتور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه از منظر اثرات ارتعاش محدودیتی ندارد. با توجه به جدول ۳، حداکثر دور موتور در دنده ۱ و ۲ برای مدت مجاز مواجهه ۸ ساعت رانندگی در روز بر روی جاده خاکی به‌ترتیب ۱۷۵۴ و ۱۳۶۱ می‌باشد و بر اساس استاندارد مربوطه، کاربر در این شرایط قادر به رانندگی تراکتور مورد بررسی در دورهای موتور بالاتر از این مقادیر نمی‌باشد.

جدول ۳- حداکثر دور موتور تراکتور در شرایط مختلف برای ۸ ساعت کار در روز

Table 3- The maximum engine rotational speed of the tractor in different conditions for 8 h working per day

نوع جاده **Road type**	موقعیت دنده **Gear ratio**	دور موتور **Engine speed (rpm)**
آسفالت Asphalt	1	4055
	2	3491
	3	2660.5
خاکی Dirt	1	1754.5
	2	1361.4
	3	293

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، با بررسی ارتعاش تمام بدن وارده بر کاربر تراکتور ITM 475 با استفاده از یک شتاب‌سنج سه‌جهته و بر اساس استاندارد بین‌المللی ارتعاش ISO 2631-1، مشخص شد که کمترین میزان ارتعاش مربوط به جاده آسفالت با پایین‌ترین دور و دنده و بیشترین میزان ارتعاش مربوط به جاده خاکی و با بیشترین دور موتور و نسبت دنده بود. در همه دورهای موتور و نسبت دنده‌های مورد بررسی، ارتعاش کل بدن در جاده خاکی از جاده آسفالت بیشتر بود. با تعیین مدت زمان مجاز مواجهه، مدت زمان حد مراقبت و واکنش کاربر، مشخص گردید که کاربر تراکتور مورد نظر در برخی شرایط باید کمتر از ۸ ساعت رانندگی کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود دور موتور و نسبت دنده پایین‌تری برای رانندگی بر روی جاده خاکی انتخاب شود.

از آن‌جا که حداکثر ارتعاش مجاز صندلی برای رانندگی تراکتور ITM 475 به مدت ۸ ساعت برابر ۰/۸۵ متر بر مجذور ثانیه است، نیاز است در طراحی تراکتور شرایطی لحاظ شود که حداکثر ارتعاش به کمتر از این میزان رسانده شود.

از آن‌جا که کاهش ارتعاش تمام بدن موجب افزایش مدت زمان مجاز مواجهه کاربر می‌شود، بازطراحی صندلی تراکتور مورد بررسی می‌تواند اثربخش باشد. می‌توان صندلی تراکتور را به یک سامانه تعلیق مناسب تجهیز نمود تا ارتعاشات تمام بدن کاهش یابد. همچنین، طراحی یک کابین مناسب با سامانه تعلیق مناسب برای کاربر تراکتور، راهی دیگر برای کاهش ارتعاشات تمام بدن تراکتور و بنابراین افزایش مدت زمان مجاز مواجهه شود؛ که با استفاده از مدل‌سازی رگرسیونی می‌توان ارتعاش تمام بدن ناشی از تراکتور مورد بررسی را با دقت بالایی برای دیگر سرعت‌ها پیش‌بینی نمود.

References

1. Ahmadi, Y., Ghamari, B., & Kheiralipour, K. (2017). *Determination and Evaluation of seat vibration of ITM 800 Tractor*. 11th Iranian National Congress on Mechanical Biosystems Engineering and Mechanization. September 12-14, Hamedan, Iran. (In Persian).
2. Ahmadian, H., Hassan-Beygi, S. R., & Ghobadian, B. (2014). Investigating a power tiller handle and seat vibration on transportation mode. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *16*(4), 194-206.
3. Beigzadeh, Y. (2013). *Investigation and analysis of vibration of motorised backpack sprayer*. M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering of Biosystems. Ilam: Ilam University. (In Persian).
4. Boshuizen, H. C., Bongers, P. M., & Hulshof, C. T. (1990). Self-reported back pain in tractor drivers exposed to whole-body vibration. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, *62*(2), 109-115. https://doi.org/10.1007/BF00383586
5. Dahham, G. A., Tawfik, S., & Saleh, S. M. (2019). Practical Study for the Effect of Speed, Direction of Acceleration and Type of Machine on Vibrations Transferred to the Steering Wheel Horticulture Tractor Type (Goldoni). *Engineering*, *11*(1), 48-58. https://doi.org/10.4236/eng.2019.111005
6. Faraji, H., Heidarbeigi, K., & Samadi, S. (2021). Characterization of vibration and noise pollution of SI engine fueled with magnetized ethanol–gasoline blends by time–frequency methods. *Noise & Vibration Worldwide*, *52*(11). https://doi.org/10.1177/09574565211030704
7. Golmohammadi, R. (2010). *Noise and Vibration Engineering.* (4th ed). Hamadan: Daneshjou Publication. (In Persian).
8. Iranian National Standard No. 14133. (2011). Agricultural wheeled tractors and farm machineries-Measuring total vibration operator body. (1st ed). (In Persian).
9. ISO 2631-1. (1997). Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration, ISO International standard.
10. Jahanbakhshi, A., Ghamari, B., & Heidarbeigi, K. (2016). Effect of engine rotation speed and gear ratio on the acoustic emission of John Deere 1055I combine harvester. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*,

18(3), 106-112.
11. Jahanbakhshi, A., Ghamari, B., & Heidarbeigi, K. (2017). Assessing acoustic emission in 1055I John Deere combine harvester using statistical and artificial intelligence methods. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, *13*(2), 105-117. https://doi.org/10.1504/IJVNV.2017.10008785
12. Jahanbakhshi, A., Ghamari, B., & Heidarbeigi, K. (2020). Vibrations analysis of combine harvester seat in time and frequency domain. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, *14*(1), 6251-6258. https://doi.org/10.15282/jmes.14.1.2020.04.0489
13. Jahanbakhshi, A., & Heidarbeigi, K. (2019). Analysis and prediction of noise pollution of garden tractor using statistical methods, artificial intelligence and ANFIS. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, *50*(3), 499-512. (In Persian). https://doi.org/10.22059/IJBSE.2019.274185.665148
14. Maleki, A. (2008). *Analysis, simulation and evaluation of human and tractor vibration*. Ph.D. Dissertation. Mechanical Engineering of Agricultural Machinery. Tehran: University of Tehran. (In Persian).
15. Melemez, K., Tunay, M., & Emir, T. (2013). The role of seat suspension in whole-body vibration affecting skidding tractor operators. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, *11*(2), 1211-1215.
16. Mohammadi, M., Mirzaee, R., & Ghal Jehi, M. (2009). *Investigation of amount of vibration transmitted to the tractor drivers in Zahedan and prevalence of musculoskeletal disorders based on Nordic questionnaire in 2008*. Esfahan: 2nd Conference on health, safety and environment; 7-8 October. (In Persian).
17. Nasiri, P., Beheshti, M. H., & Hajizadeh, R. (2014). Evaluation of exposure time of tiller operators to vibration. *Sound and Vibration*, *3*(6), 66-74. (In Persian).
18. Nasiri, P., Mohammadi, A., Beheshti, M. H., Azam, K., & Hajizadeh, R. (2013). Evaluation of Massey Ferguson Model 165 Tractor Drivers exposed to whole-body vibration. *Journal of Health and Safety at Work*, *3*(3), 55-62. (In Persian).
19. Sanai, G., Ghazaee, S., Zia Zarifi, A., & Habibi, A. (1995). Occupational contact limits of pathogens, *Ministry of Health and Medical Education*, 327-340. (In Persian).
20. Taghizade Alisaraee, A., Tavakoli Hashjin, T., & Ghobadian, B. (2007). Investigation of vibration of seat of U650 tractor. *Iranian Journal of Agriculture Science*, *38*(4), 571-580. (In Persian).
21. Taghizade Alisaraee, A. (2011). *Investigation of parameters of vibration signal of MF 399 Tractor by diesel and biodiesel fuels*. Ph.D. Dissertation. Tehran: Tarbiat Modares University. (In Persian).
22. Tewari, V. K., Dewangan, K. N., & Karmakar, S. (2004). Operator's fatigue in field operation of hand tractors. *Biosystems Engineering*, *89*(1), 1-11. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.05.006